ارزیابی حرارت ورودی بر تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیم 7020-T6 در جوشکاری TIG★

محمد علیپور بهزادی [۱] خلیل رنجبر [۲] رضا دهملایی [۳]

چکیده

در این پژوهش از فرایند جوشکاری TIG با جریان پالسی و ثابت برای اتصال آلیاژ آلومینیم 7020-T6 استفاده شد. تأثیر شدّت‌جریان (حرارت ورودی) بر ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده و همچنین تغییرات پهنای منطقهٔ متأثر از حرارت، مورد بررسی قرار گرفت. به‌وسیله کاشتن ترموکوپل در ناحیهٔ اتصال تغییرات دمایی اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی انجام گردید. به‌منظور بررسی دمای تشکیل رسوبات، آنالیز گرما سنجی افتراقی (DSC) انجام گردید. همچنین آزمون میکرو سختی و کشش جهت ارزیابی خواص مکانیکی به عمل آمد. بررسی‌ها نشان داد در جوشکاری TIG پالسی نسبت به TIG معمولی کاهش فراوانی در اندازهٔ دانه ناحیهٔ جوش صورت گرفته، ولی با افزایش حرارت ورودی اندازهٔ دانه این ناحیهٔ و پهنای منطقهٔ متأثر از حرارت نیز افزایش نسبی یافته است. نتایج نشان داد که بر خلاف نتایج مطالعات پیشین در آلیاژهای رسوب سخت شونده، استحکام در ناحیه‌ی جوش نسبت به فلز زمینه افزایش قابل‌توجّهی یافته است. بهبود نسبی خواص مکانیکی در ناحیهٔ جوش علیرغم افزایش حرارت ورودی و افزایش نسبی اندازهٔ دانه‌ها، به دلیل انیل انحلالی و رسوب مجدد ذرات رسوبی استحکام‌بخش در حین سرد کردن از دمای اتصال ارزیابی گردید.

واژه‌های کلیدی آلیاژ آلومینیم 7020-T6، جوشکاری TIG، حرارت ورودی، جریان پالسی، خواص مکانیکی.

Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of A7020-T6 Alloy Joined by TIG Welding

M. Alipour Behzadi Kh. Ranjbar R. Dehmolaie

Abstract

In this study butt joining of 7020-T6 alloy was performed using tungsten inert gas (TIG) welding with continuous (constant) and pulsed current. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of the joints was investigated. Microstructural examinations were conducted using optical and scanning electron microscopy. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to identify the precipitates phase evolution. Temperature at the welding region was recorded by inserting thermocouples. Hardness and tensile strength of the joints was evaluated. Results showed that current pulsing leads to relatively finer grain size in weld metal compare to the one welded by constant current. In either cases of constant and pulsed current, the grain size and the width of heat affected zone increased with increasing heat input. Unlike earlier studies in precipitation hardening aluminum alloys, strength of the weld metal were increased as compare to base metal in T6 condition. The enhancement in mechanical properties of weld metal was attributed to the solution annealing and re-formation of strengthening precipitates on cooling from welding temperature.

Keywords A7020-T6 Alloy, TIG Welding, Heat Input, Heat Affected Zone, Pulsed Current, Mechanical Properties,

---

★ نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۶/۶/۵ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۷/۱۲/۲۶ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱)نویسنده مسئول، کارشناس ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، گروه مواد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

Email: Alipourmohamad@yahoo.com

(۲)استاد، مهندسی مواد و متالورژی، گروه مواد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(۳)استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، گروه مواد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

DOI:10.22067/ma.v31i1.67083

مقدّمه

آلیاژ آلومینیم ۷۰۲۰ ازجمله آلیاژهای استحکام متوسّط و پرمصرف در صنایع هوافضا و کشتی‌سازی است که جز آلیاژهای جوش پذیر گروه ۷۰۰۰ محسوب می‌شود. این آلیاژ جز آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر بوده که استحکام خود را از طریق تشکیل رسوبات طی عملیات حرارتی رسوب سختی به دست می‌آورد؛ امّا در حین جوشکاری، با توجّه به سیکل عملیات حرارتی که آلیاژ تجربه می‌کند، این رسوبات دچار دگرگونی از قبیل حل شدن، درشت شدن و یا تشکیل مجدد می‌گردد. این امر می‌تواند خواص مکانیکی از قبیل استحکام و سختی ناحیهٔ اتصال را تحت تأثیر قرار دهد. برخلاف آلیاژهای غیرقابل عملیات حرارتی آلومینیم که استحکام خود را مدیون اندازهٔ دانه هستند، در این‌گونه آلیاژها، رسوبات تعیین‌کننده هستند [۱]. در جوشکاری ذوبی این آلیاژها به خاطر حرارت ورودی بالا اغلب رسوبات قبلی حل‌شده و درشت شدن دانه‌ها در ناحیهٔ جوش به‌وفور دیده می‌شود. به همین خاطر معمولاً سختی و استحکام ناحیهٔ جوش این آلیاژها نسبت به فلز زمینه پیرسازی شده و یا کارشده کاهش میابد. کاهش اندازهٔ دانه در ناحیهٔ جوش و ناحیهٔ متأثر از حرارت می‌تواند از ترک‌خوردگی انجمادی جوش کاسته و خواص مکانیکی را نیز بهبود بخشد. در همین خصوص تأثیر افزودن مواد جوانه زا ازجمله تیتانیم و بور (از طریق پرکننده) در ناحیهٔ جوش ذوبی آلیاژ 7020 مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل نشان داده که درنتیجه ریز شدن دانه‌های ناحیهٔ جوش، نه‌تنها ترک‌خوردگی انجمادی کاهش‌یافته بلکه استحکام کششی آلیاژ نیز بهبود می‌یابد [2]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از جوشکاری TIG پالسی به‌جای TIG با جریان ثابت هم می‌توان از درشت شدن دانه فلز جوش و منطقهٔ متأثر از حرارت جلوگیری نمود. به‌نحوی‌که استفاده مناسب از متغیرهای پالس باعث کاهش پهنای HAZ و جلوگیری از درشت شدن و درنتیجه پیر شدن بیش‌ازحد ساختار موجود در ناحیهٔ HAZ خواهد شد [3]. در یک کار تحقیقی تأثیر جریان پالسی بر خواص مکانیکی آلیاژ 7075 با روش جوشکاری GTAW مورد بررسی گرفت و نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از جریان پالسی تأثیر به‌سزایی در کاهش اندازهٔ دانه ناحیهٔ جوش و بهبود استحکام ناحیهٔ جوش دارد [4]. تأثیر هم‌زمان لرزش مغناطیسی و جریان پالسی بر روی ریز شدن دانه در ناحیهٔ جوش ذوبی آلیاژ 2219-T87 نشان داد که اعمال این دو روش تأثیر به‌سزایی در ریز شدن دانه‌ها در ناحیهٔ جوش دارد [5]. ریز شدن دانه در ناحیهٔ جوش و رفتار خستگی آلیاژ 7075 آلومینیم نورد شده نشان داد که استفاده از جریان پالسی علاوه بر ریز کردن دانه‌ها در ناحیهٔ جوش، موجب بهبود مقاومت خستگی به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد می‌گردد [6]. در یک تحقیق دیگر نرم شدن ناحیهٔ متأثر از حرارت در جوشکاری آلیاژ 7005 با استفاده از جریان پالسی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج دمای ۲۰۰ و ۳۸۰ درجه را به ترتیب برای نرم شدن ناحیهٔ متأثر از حرارت و حل شدن رسوبات تأیید کردند [7]. همچنین در تحقیق ذکرشده، بازیابی سختی در ناحیهٔ متأثر از حرارت پس از حل شدن رسوبات مشاهده گردید. در یک بررسی مشابه تأثیر حرارت ورودی بر رفتار سختی ناحیهٔ جوش آلیاژ 7020 و 7022 مورد بررسی قرار گرفت [1]. نتایج تحقیق ذکرشده نشان داد که با افزایش حرارت ورودی نرم شدن ناحیهٔ متأثر از حرارت شدّت بیشتری یافته امّا در عملیات حرارتی پس گرم چه به‌صورت طبیعی و یا مصنوعی، بازیابی سختی در اثر تشکیل رسوبات صورت می‌گیرد. همچنین گزارش شده است که با استفاده از جریان پالسی به‌جای جریان پیوسته در جوشکاری TIG می‌توان حساسیت به ترک ذوبی در ناحیهٔ HAZ را کاهش داده[8-11] و خواص مکانیکی جوش را بهبود بخشید.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که اطلاعات محدودی در خصوص تأثیر جریان پالسی بر جوشکاری آلیاژ A7020-T6 وجود دارد. لذا در این پژوهش سعی شده است به‌منظور بررسی اثر حرارت ورودی از طریق تغییرات شدّت‌جریان

پالس ایجادشده به‌وسیله جوشکاری ذوبی، انتخاب درستی در مشخصات جوشکاری این نوع آلیاژها داشت. همچنین با توجّه به ضعف منطقهٔ متأثر از حرارت و تغییرات پهنای این منطقه با حرارت ورودی و شدّت پالس، می‌بایست ارزیابی درستی از این منطقه داشت و با اتخاذ تدابیر لازم شرایط مناسبی برای جوشکاری ایجاد کرد. برای این مهم، در این پژوهش، تأثیر شدّت‌جریان (حرارت ورودی) بر ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده آلیاژ A7020-T6 توسط فرایند جوشکاری TIG مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تغییرات پهنای منطقهٔ متأثر از حرارت با افزایش حرارت ورودی، مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییرات دمایی در نواحی مختلف اتصال به‌وسیله کار گذاشتن ترموکوپل اندازه‌گیری شد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق آلیاژ آلومینیم 7020-T6 به ضخامت ۷ mm استفاده گردید. ترکیب شیمیایی آلیاژ مذکور در جدول (۱) آورده شده است. نمونه‌هایی به ابعاد 100 mm x 100 mm تهیه و فرایند جوشکاری TIG با تعداد ۳ پاس و دمای بین پاسی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، به‌وسیله فلز پرکننده ER5356 (ترکیب شیمیایی در جدول (۲) ارائه شده است) روی آن‌ها انجام شد. مشخصات و پارامترهای جوشکاری مذکور در جدول (۳) آورده شده است. برای تعیین شدّت‌جریان میانگین و حرارت ورودی در جوشکاری پالسی از رابطهٔ (۱) استفاده شد [10]. هم‌چنین جهت محاسبه حرارت ورودی نمونه‌های جوشکاری شده به روش TIG از رابطهٔ (۲) استفاده گردید:

$$I_m = \frac{(I_p * t_p) + (I_b * t_b)}{t_p + t_p} \quad (۱)$$

$$H.I = (I_m * V * 60)/(\text{Travel Speed}) \quad (۲)$$

که در آن منظور از I_m جریان متوسّط و V ولتاژ است.

در حین جوشکاری جهت اندازه‌گیری دمای اطراف ناحیهٔ جوش از لبهٔ ورق، ٤ عدد ترموکوپل از نوع K مطابق با شکل (۱) انجام گردید و همچنین برای ثبت این داده‌ها از دستگاه دیتالاگر مدل Field logger استفاده گردید.

نمونه‌ها در جهت عمود برجوش برش داده شدند و به‌منظور بررسی‌های ریزساختاری، پس از صیقل‌کاری مکانیکی، با استفاده از محلول کلر (با ترکیب ۱ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید، ۱/۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید، ۲/۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید و ۹۵ میلی‌لیتر آب) عملیات حکاکی انجام شد. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری، الکترونی روبشی به مدل Mira 3-XMU و الکترونی عبوری به مدل STEM, JEOL JEM-2100F انجام گردید. به‌منظور بررسی دمای تشکیل رسوبات، آنالیز گرما سنجی افتراقی (DSC) با نمونه‌ای به ابعاد یک استوانه به قطر ۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱ میلی‌متر از فلز پایه و با نرخ گرمایش ۱۰ $^\circ$C/min در محیط گاز آرگون با نرخ ۸۰ ml/min به‌وسیله دستگاه STARe system METTLER TOLEDO انجام گردید. همچنین به‌منظور ارزیابی میکروسختی نمونه‌های جوش داده‌شده، از آزمایش سختی سنجی ویکرز با اعمال بار ۳۰۰ گرم برای مدت ۱۵ ثانیه استفاده شد. جهت بررسی استحکام اتصال، آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 انجام گردید. مشخصات کامل نمونه آزمون کشش در شکل (۲) نمایش داده شده است.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۷۰۲۰

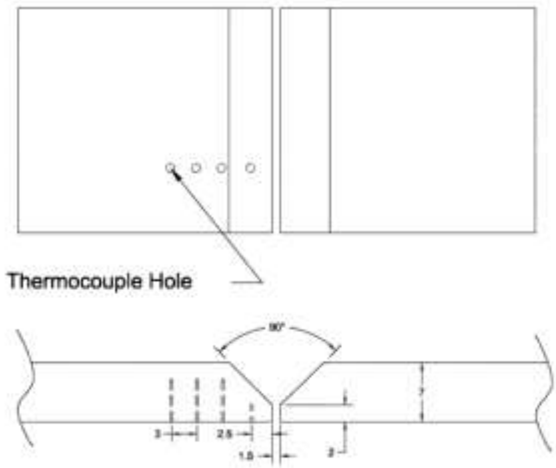
عناصر آلیاژی	Zn	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Ti	Zr	Cu	Other Elem	Al
درصد وزنی	3.98	0.90	0.1	0.25	0.21	0.17	0.04	0.10	0.11	0.14	Rem

جدول (۲) ترکیب شیمیایی فلز پرکننده ER5356 بر حسب درصد وزنی

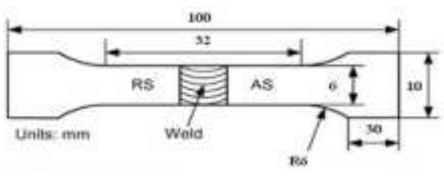
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al	Be	OE	OT
0.25 max	0.40 max	0.10 max	0.05-0.20	4.5 - 5.5	0.05-0.20	0.10 max	0.06-0.20	-	BAL	0.0003 max	0.05 max	0.015 max

جدول (۳) پارامترهای استفاده‌شده در جوشکاری TIG

Sample	Process	Filler	Filler Dia (mm)	Gas flow rate (l/min)	Polarity	Pulse Properties			Amperage			Voltage	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (Kj/mm)
						tP	tB	frequency (Hz)	Peak	Base	Average			
AC140A	TIG	ER 5356	1.6	14	AC	-	-	-	140	-	-	22-28	80	2.94
P160A	PULSE -TIG	ER 5356	1.6	14	AC	3	1	3	160	70	137	22-27	80	2.78
P170A	PULSE -TIG	ER 5356	1.6	14	AC	3	1	3	170	75	146	23-29	85	2.98
P195A	PULSE -TIG	ER 5356	1.6	14	AC	3	1	3	195	95	170	24-30	90	3.40



شکل (۱) شماتیک کارگذاری ترموکوپل‌ها در جوشکاری TIG.

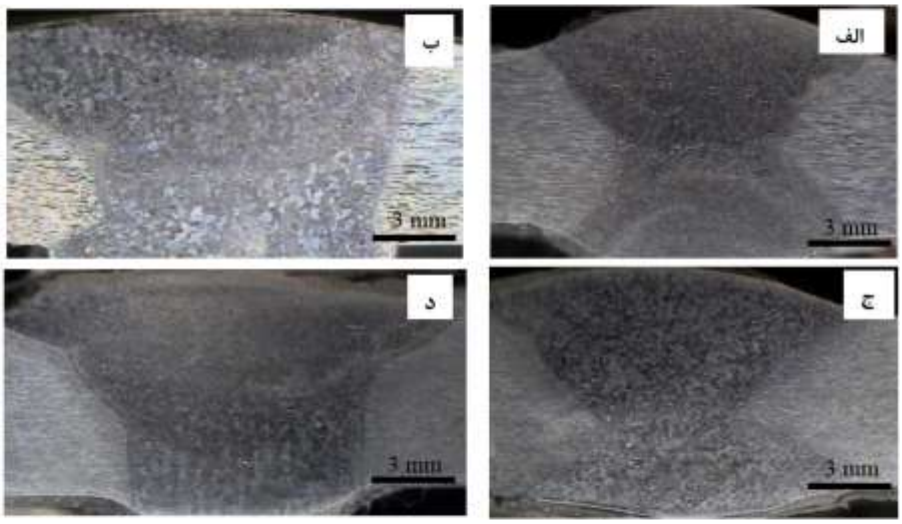


شکل (۲) شماتیک و مشخصات نمونه آزمون کشش

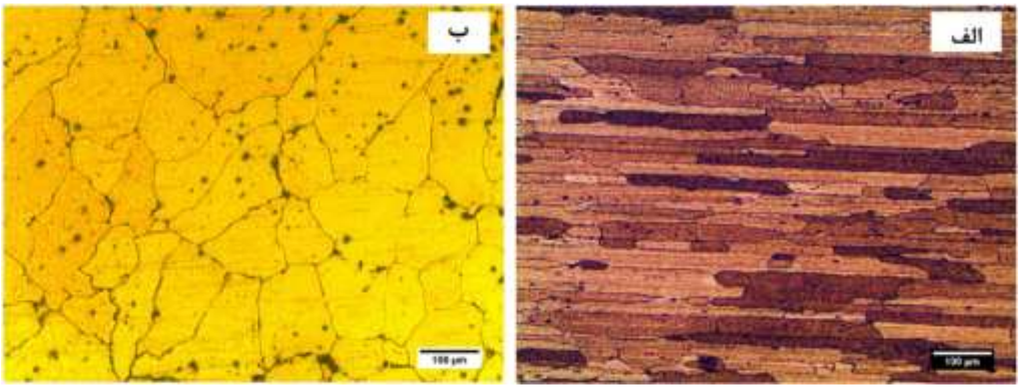
نتایج و بحث

ریزساختار فلز جوش. شکل (۳ – الف) ریزساختار فلز جوش مربوط به نمونه AC140 را نشان می‌دهد. ماکروگراف نشان می‌دهد که اتصال دو فلز پایه به روش جوشکاری TIG به‌صورت کامل انجام گردیده و لایه‌های جوش اولیّه، ثانویّه و جوش پشتی امتزاج کامل یافته و فاقد عیوب ماکرو است. در شکل‌های (۳ ب، ج و د) که به ترتیب مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با جریان پالسی P160، P170 و P195 است، این موضوع صادق بوده و جوش‌ها عاری از عیوب ماکرو و ظاهری می‌باشند.

شکل (٤ الف و ب) به ترتیب تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز پایه قبل از جوشکاری و همچنین ریزساختار فلز جوش با جزیان ثابت را نشان می‌دهد. دانه‌ها در فلز پایه کوچک‌تر و به‌صورت کشیده شده در راستای نورد می‌باشند ولی اندازهٔ دانه در فلز جوش نسبتاً بزرگ‌تر و هم محورتر هستند. ساختار کشیده و نوردی دانه در فلز پایه در ناحیهٔ جوش، پس از انحلال مجدداً شکل گرفته‌اند، امّا به دلیل حرارت ورودی بالا نسبتاً درشت هستند. جریان پالسی در جوشکاری TIG به دلیل برخورداری از ماهیت ضربانی قوس الکتریکی به وجود آمده منجر به هم زدن هم‌زمان حوضچه جوش در حین جوشکاری و ریز شدن دانه‌ها می‌شود و درنهایت ریزساختار جوش ظریف‌تری نسبت به جوشکاری با استفاده از جریان پیوسته ارائه می‌دهد[12,13].



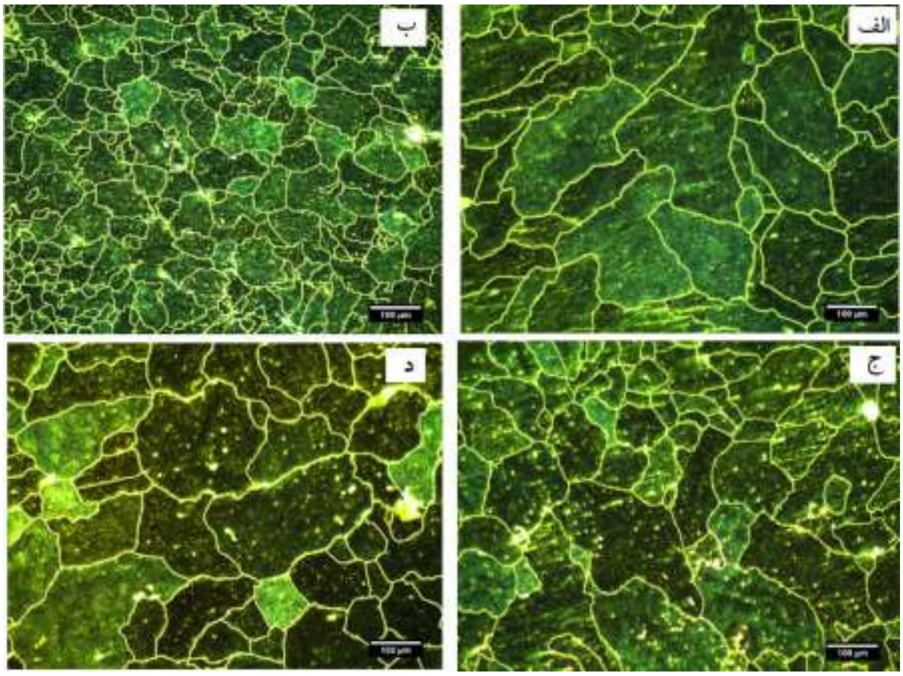
شکل (۳) متالوگرافی (ماکرو) از مقطع عرضی جوش‌های حاصل از جوشکاری TIG الف: AC140A، ب: P160A، ج: P170A و د: P195A



شکل (٤) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار الف: فلز پایه ب: ناحیهٔ جوش با جریان ثابت نمونه AC140

شکل (۵) ریزساختار دانه در فلز جوش نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با مقایسه تصویر (۵–الف و ب) که به ترتیب مربوط به نمونه‌های AC140 و P160 است، می‌توان دریافت که دانه‌های ر ریزساختار نمونه P160 بسیار ریزتر شده‌اند. دلیل ریز شدن دانه‌ها ناشی فرایند TIG پالسی است به‌نحوی‌که در این نمونه به‌رغم اینکه شدّت‌جریان اولیّه بالاتر بوده، امّا حرارت ورودی به نمونه کاهش‌یافته است. تأثیر اعمال جریان پالسی جهت به دست آوردن ساختار ریزدانه در ناحیهٔ ذوبی جوش، توسط پژوهش‌های زیادی گزارش شده است [13-15] که نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند.

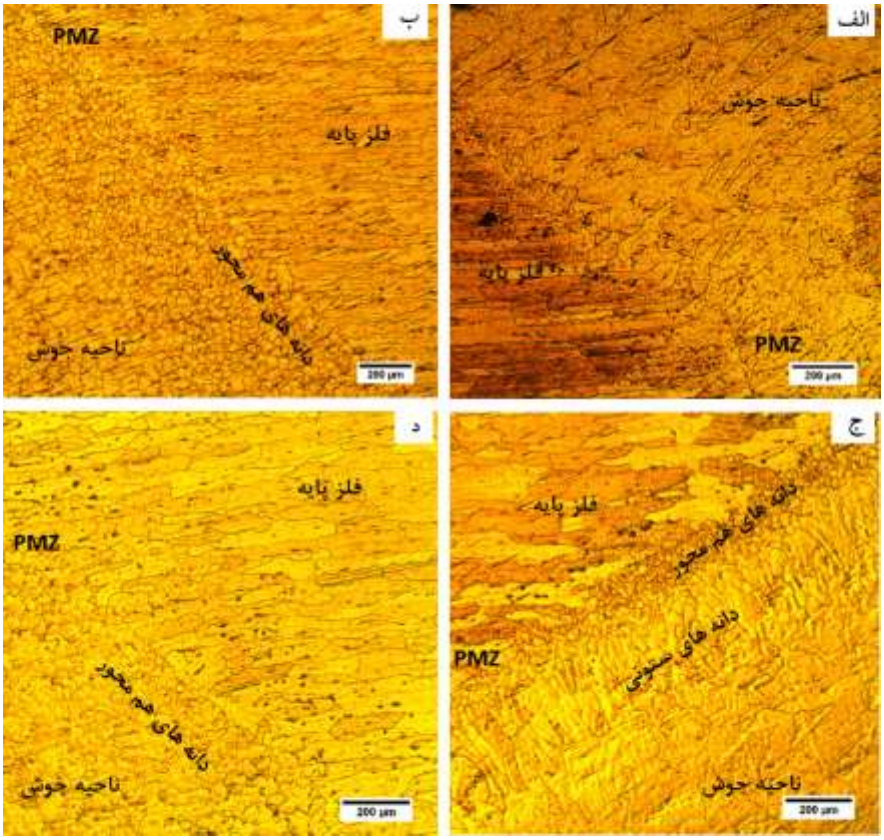
ارزیابی ریزساختار فصل مشترک جوش و فلز پایه. شکل (۷) ریزساختار فصل مشترک بین فلز جوش و فلز پایه نمونه‌های مختلف جوشکاری شده را نشان می‌دهد. این فصل مشترک شامل ناحیهٔ ذوب موضعی (PMZ) است. در شکل (۷ – الف) برای نمونه AC140A فصل مشترک فلز پایه و فلز جوش، این ناحیهٔ به‌صورت مرزی باریک در امتداد خط جوش مشخص است. ساختار دانه در فصل مشترک این نمونه بدون تغییر اساسی به‌صورت هم بافته دیده می‌شود. این فصل مشترک در نمونه‌های جوشکاری شده با جریان پالسی (شکل–۷ ب، ج، د) کاملاً متمایز بوده و دارای یک ناحیهٔ با دانه‌های بسیار ریز سلولی و هم‌محور و چسبیده به مرز اتصال است. در این نمونه‌ها نیز رشد هم بافته دیده می‌شود. در شکل(۷ – ب) و مقایسه آن با اشکال(۷ – ج و ۷ – د)، تأثیر حرارت ورودی در شکل‌گیری این ناحیهٔ به‌وضوح دیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش حرارت ورودی در جریان پالسی، عرض ناحیهٔ کاهش‌یافته است (حرارت ورودی کمتر نمونهP160A حدود Kj/mm ۲/۹٤ و نمونه P195A با حرارت ورودی بیشتر حدود Kj/mm ۳/٤۰).



شکل (۵) ریزساختار فلز جوش نمونه‌های مختلف توسط فرایند TIG، الف: AC140A، ب: P160A، ج: P170A و د:P195A



شکل (٦) نمودار متوسّط اندازهٔ دانه در ناحیهٔ جوش نمونه‌های جوشکاری شده توسط فرایند TIG



شکل (۷) ریزساختار فصل مشترک بین جوش و فلز پایه نمونه‌های مختلف جوش شده توسط فرایند TIG، الف: AC140A، ب: P160A، ج: P170A و د: P195A

درواقع دانه‌های هم‌محور رشد یافته از ناحیهٔ ذوب موضعی است. در اثر اعمال جریان پالسی می‌توان گفت که در امر ذوب موضعی، انجماد حوضچه مذاب و شیب حرارتی پیوسته خلل ایجاد شده و با نوسانات حرارتی ایجاد شده از رشد بیشتر دانه‌های تشکیل‌شده جلوگیری می‌شود. همچنین دانه‌های ستونی شکل‌گرفته از خط ذوب درهم‌شکسته شده و جلو پیشروی آن‌ها گرفته می‌شود. در هم شکستن ساختار ستونی و تشکیل دانه‌های هم‌محور در جوش قوسی پالسی قبلاً نیز گزارش شده است [13-16].

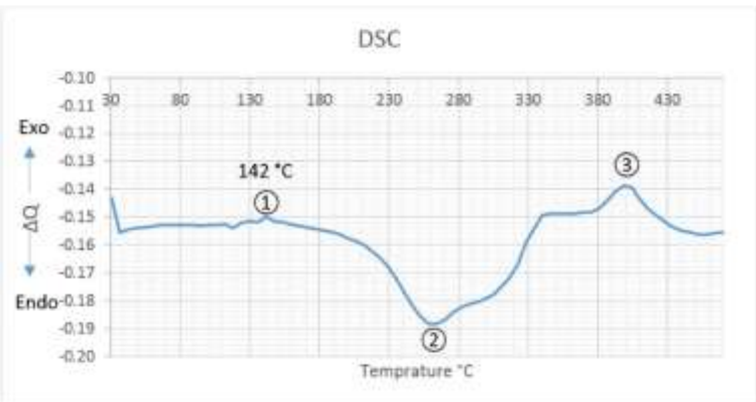
در نمونه‌های P160A و P170A هرچند که رشد

هم‌محور دانه‌های ستونی در ریشه جوش اتفاق افتاده است (شکل ۷ – ب و ج) امّا در سطح جوش دانه‌های هم‌محور ریز موجود است. این اساساً ناشی از عدم اغتشاش کافی برای شکستن نوک دندریت‌ها در حوضچه جوش است. این حالت به‌طورکلی وقتی اتفاق می‌افتد که قوس نوسان شده با آمپراژ و فرکانس بالا بوده و ورق جوش ضخیم باشد. هم‌چنین این وضعیت در حالتی که قوس نوسانی در عمق کم نفوذ و گسترش طول ناحیهٔ متأثر از حرارت منجر شود اتفاق می‌افتد [17].

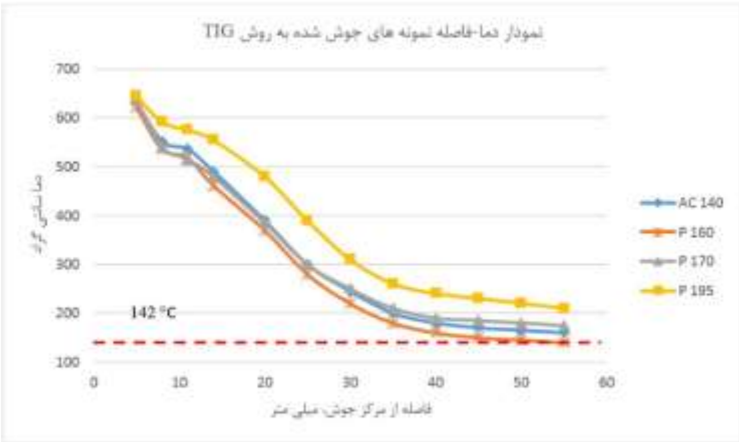
تأثیر حرارت ورودی بر گسترش ناحیهٔ متأثر از حرارت.
ناحیهٔ ۱ شامل پیک گرمازایی در دمای ۱۴۲ °C و مربوط به رسوب‌گذاری و تشکیل مناطق GP پسماند است (به نظر می‌رسد این رسوبات در عملیات حرارتی T6 به‌طور کامل تشکیل نشده بودند). ناحیهٔ ۲ پیک گرماگیر تا قبل از دمای ۲٦٤ °C، ماکزیمم حد رشد رسوبات ($MgZn_2$) ή را نشان می‌دهد و در ادامه پس از دمای ۲٦٤ °C جایی که پیک رو به گرمازا می‌رود نشان‌دهنده تبدیل رسوبات ή به رسوبات η است. ناحیهٔ ۳ پیک گرمازا در دمای ٤٠٤ °C نشان‌دهنده تشکیل و رشد رسوبات η است. پس‌ازاین دما، شروع حل شدن رسوبات η است؛ بنابراین شروع دمای تحولات ریزساختاری رسوبات همان‌طور که در شکل (۸ و ۹) مشخص است ۱۴۲ °C معین گردید، درواقع مرز ناحیهٔ متأثر از حرارت که منجر به ایجاد و شکل‌گیری رسوبات می‌گردد.

ارزیابی انجام‌شده، با پژوهش‌های پیشین[18,19] مطابقت داده شد.

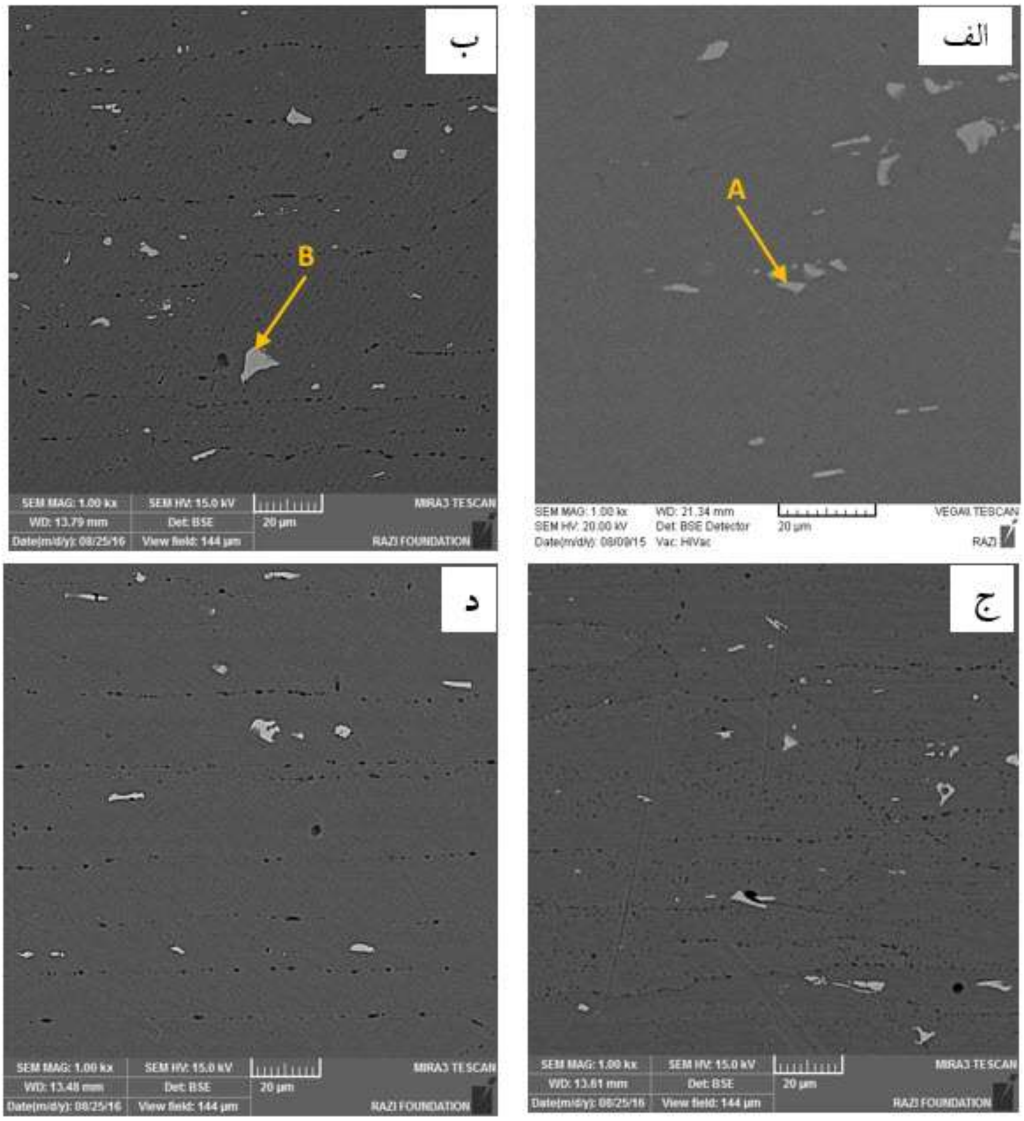
شکل (۹) نمودار دما–فاصله، توسط ترموکوپل‌های کار گذاشته شده در ناحیهٔ به‌دست‌آمده است. در این نمودار، با قرار دادن دمای مبنا دمای ۱۴۲ که قبلاً توسط آزمون احتراقی افتراقی به‌دست‌آمده، می‌توان پهنای منطقهٔ متأثر از حرارت را ارزیابی کرد. این دما شروع تحولات ریزساختاری در نظر گرفته شده است. با توجّه به محدودیت‌های موجود در ترموکوپل گذاری در ناحیهٔ جوش، برای به دست آوردن دما در فواصل بیشتر از مرکز جوش، شبیه‌سازی حرارتی توسط نرم‌افزار کامپیوتری انجام گردید. لذا نمودار شکل ۹ نتایج عملی تا فاصله ١٤ میلی‌متری از مرکز جوش و مابقی فواصل شبیه‌سازی‌شده است. با رسم خطی افقی بر مبنای دمای ۱۴۲ درجه سانتی‌گراد می‌توان نقطه قطع‌شده در هر منحنی (مربوط به هر نمونه) را به دست آورد و سپس با امتداد آن به‌صورت عمودی بر محور افقی، پهنای منطقهٔ متأثر از حرارت هر نمونه را به دست آورد. همان‌طور که از نمودار مشخص است به دلیل اینکه طول نمونه‌ها ۱۰۰ میلی‌متر و پیک‌های به‌دست‌آمده بیشتر از دمای مبنا بوده است، نمی‌توان پهنای دقیقی برای منطقهٔ متأثر از حرارت در این روش جوشکاری به دست آورد. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت پهنای منطقهٔ متأثر از حرارت برای نمونه‌های جوش شده به روش TIG بیشتر از طول نمونه‌های جوش شده است. دلیل این امر به جریان و حرارت ورودی بالا در روش TIG برمی‌گردد.

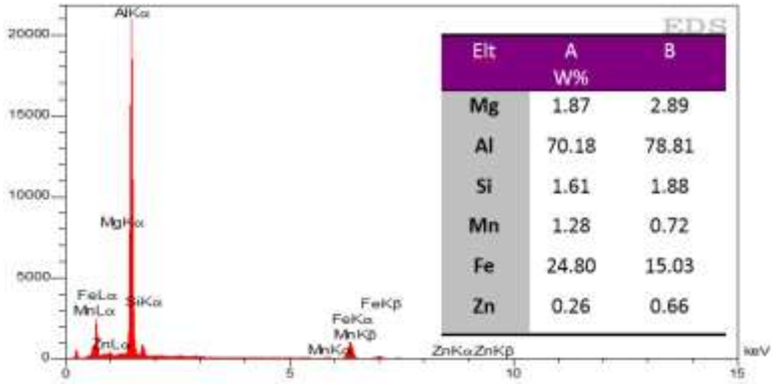


شکل (۸) نمودار به‌دست‌آمده از آزمایش آنالیز احتراقی افتراقی بر روی آلیاژ ۷۰۲۰

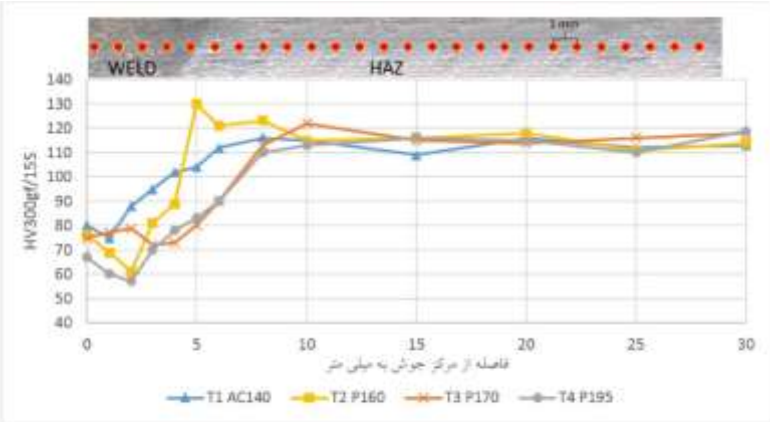


شکل (۹) نمودار دما–فاصله نمونه‌های جوش شده به روش TIG





شکل (۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برگشتی از ناحیهٔ جوش نمونه‌های مختلف TIG، الف: نمونه Baseب: AC140A ج:P160A د: P195A به همراه آنالیز EDS از ناحیهٔ جوش طیف مربوطه و جدول آنالیز نقاط



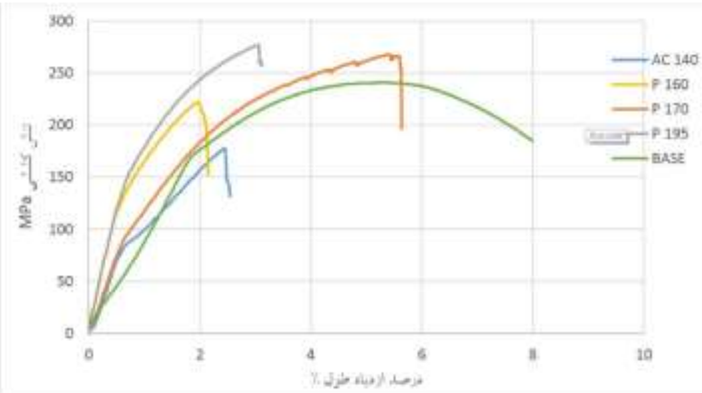
شکل (۱۱) نمودار میکرو سختی نمونه‌های جوش شده به روش TIG

بررسی رسوبات و ترکیبات بین فلزی. شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فلز پایه و ساختار فلز جوش را تحت شرایط AC140A، P160A و P195A نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آنالیز نقطه‌ای EDS ساختار فلز پایه و جوش حاوی ترکیبات بین فلزی پراکنده‌ای است که در زمینه توزیع شده و از نوع ترکیبات بین فلزی آهن، سیلیسیم و منگنز دار است. به نظر می‌رسد جریان پالسی با ایجاد تلاطم در حوضچه مذاب به ریز ماندن این ترکیبات، شکسته شدن و انحلال ترکیبات بین فلزی کمک کرده است.

سختی و استحکام. شکل (۱۱) نمودار میکرو سختی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های جوش شده توسط فرآیند TIG را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است میزان سختی در منطقهٔ جوش به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش‌یافته است. بالا رفتن دما در ناحیهٔ جوش و حل شدن رسوبات قبلی و همچنین درشت شدن دانه‌ها در این منطقه پس از اتصال، همه در کاهش سختی نقش دارند. این کاهش با فاصله گرفته از مرکز جوش به سمت فلز پایه کمتر می‌شود. درواقع بازیابی جزئی سختی در حین سرد شدن از دمای جوش صورت می‌گیرد. همین اتفاق با شدّت کمتر در ناحیهٔ گسترده متأثر از حرارت اتفاق می‌افتد. به همین خاطر سختی ناحیهٔ متأثر از حرارت نسبت به سختی فلز پایه نسبتاً بالاتر است. سختی نسبتاً بالاتر ناحیه‌های PMZ و HAZ در مقایسه با ناحیهٔ جوش ناشی از تشکیل دانه‌های تبلور مجدد یافته خیلی ریز است [4,20]. در مجاورت ناحیهٔ جوش و ناحیهٔ

متأثر از حرارت ناحیۀای با دانه‌های ریز هم‌محور دیده می‌شود که در بازیابی سختی تأثیر مثبت می‌گذارد. در پژوهش‌های متعدّدی [1,21-23] با بررسی فرآیندهای مختلف ذوبی(GTAW و GMAW) بر روی سختی نمونه‌های جوش شده آلیاژهای سری Al-Zn-Mg گزارش گردیده است که میزان سختی در ناحیۀ جوش پس از جوشکاری افت شدیدی خواهد کرد. همچنین این موضوع برای فرایندهای پالسی نیز گزارش گردیده است[3,21]. شکل (۱۲) نمودار تنش-ازدیاد طول آزمون کشش نمونه‌های جوش شده به روش TIG را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است بیشترین میزان استحکام کششی به‌دست‌آمده مربوط به نمونه P195A و کمترین میزان نیز مربوط به نمونه AC140A است. طبق این نمودار استحکام کششی مربوط به نمونه‌های AC140A و P160A از فلز پایه کمتر است ولی نتایج مربوط به نمونه‌های P170A و P195A بیشتر از استحکام کششی فلز پایه است.

همان‌طور که قبلاً گفته شد استحکام نمونه‌های جوش این آلیاژ را نمی‌توان به‌اندازۀ دانه ربط داد بلکه ناشی از توزیع و اندازۀ رسوبات است؛ زیرا که با افزایش شدّت‌جریان، اندازۀ دانه ناحیۀ جوش و میزان استحکام هم‌زمان افزایش‌یافته است. ولی با اعمال جریان پالسی استحکام نمونه جوش نسبت به نمونه جوشکاری شده با جریان ثابت افزایش یافته است. گزارش گردیده است [4]. در جوشکاری TIG آلیاژ ۷۰۷۵ با جریان پالسی می‌تواند سبب بهبود استحکام نمونه جوش شود. بهبود استحکام نمونه‌های جوشکاری شده با جریان پالسی را می‌توان به پیرسازی خودبه‌خودی این نمونه‌ها مرتبط دانست. به‌عبارت‌دیگر تمامی نمونه‌ها در ناحیۀ جوش، انیل انحلالی و حل شدن رسوبات قبلی را تجربه می‌کنند. در این نمونه‌ها در حین سرد شدن، رسوبات شروع به تشکیل مجدد می‌کنند. حال، هر چه حرارت ورودی بالاتر باشد، مدت‌زمان قرارگیری نمونه در معرض دمای بالاتر (دمای بالاتر از ۱۴۲ درجه یعنی دمای شروع تشکیل رسوبات) نیز زیادتر شده و احتمال تشکیل رسوبات در حین سرد شدن نیز افزایش میابد. مقایسه شکل دما- زمان (شکل ۹) و نمودار کششی شکل (۱۲) این مطلب را به‌وضوح نشان می‌دهد. شکل (۱۳) شکست نگاری نمونه‌های جوش با روش TIG پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد. محل شکست تمامی نمونه‌ها پس از آزمون کشش، از ناحیۀ جوش است. دلیل این امر را می‌توان به ساختار جوش درشت‌دانه این آلیاژ مرتبط دانست. گزارش شده است که ضعف ناحیۀ جوش علت اصلی شکست از این ناحیۀ است [۳].



شکل (۱۲) نمودار آزمون کشش نمونه‌های جوش شده به روش TIG



شکل (۱۳) تصویر نمونه‌های جوش شده به روش TIG پس از شکست در آزمون کشش

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر شدّت‌جریان (حرارت ورودی) بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ A7020-T6 نمونه‌های جوشکاری شده توسط فرایند جوشکاری TIG با دو جریان ثابت و پالسی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تغییرات پهنای منطقهٔ متأثر از حرارت با افزایش حرارت ورودی، مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق از قرار زیر است:

۱. در جوشکاری TIG پالسی نسبت به TIG معمولی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در اندازهٔ دانه ناحیهٔ جوش صورت گرفت (حدود ١٦٦ میکرومتر)، ولی با افزایش حرارت ورودی اندازهٔ دانه این ناحیهٔ نیز افزایش‌یافته است.

۲. ترکیبات بین فلزی در نمونه‌های TIG پالسی اندکی شکسته شده و توزیع یکنواخت‌تری نسبت به TIG معمولی پیدا کرده‌اند.

۳. در هر دو روش جوشکاری با جریان ثابت و پالسی، به خاطر زیاد بودن حرارت ورودی، ناحیهٔ HAZ بسیار گسترده و قابل ارزیابی نبود. همچنین در هردو روش رشته هم بافته فلز جوش و فلز پایه در ناحیهٔ اتصال دیده می‌شود.

٤. استفاده از جریان پالسی در فصل مشترک اتصال، باعث ایجاد یک ناحیهٔ با دانه‌های ریز هم‌محور می‌شود که در جوشکاری با جریان ثابت این ناحیهٔ دیده نمی‌شود. علت این امر به دلیل برخورداری از ماهیت ضربانی قوس الکتریکی به وجود آمده است که منجر به هم زدن هم‌زمان حوضچه جوش در حین جوشکاری شده و موجب ریزدانه شدن ساختار جوش شده است.

۵. استحکام نمونه‌های جوشکاری شده با جریان پالسی با افزایش شدّت پالس افزایش‌یافته و نسبت به استحکام فلز پایه و استحکام نمونه جوشکاری شده با جریان ثابت از میزان به‌مراتب بالاتری برخوردار است. بالاترین استحکام مربوط به نمونه جوشکاری شده با بالاترین شدّت پالس است. دلیل این رفتار، مربوط به تشکیل مجدد رسوبات در حین سرد شدن از ناحیهٔ اتصال است. به‌عبارت‌دیگر حرارت ورودی بالاتر، فرصت بیشتری برای تشکیل رسوبات ایجاد می‌کند.

مراجع

1. T. Ma, G. Den Ouden, Softening behaviour of Al–Zn–Mg alloys due to welding, Materials Science and Engineering:VOL. 266, No. 1, pp. 198-204 (1999)
2. G.J. Ram, T. Mitra, V. Shankar, S. Sundaresan, Microstructural refinement through inoculation of type 7020 Al–Zn–Mg alloy welds and its effect on hot cracking and tensile properties, *Journal of Materials Processing Technology* VOL. 142, No. 1, pp. 174-181 (2003).
3. K. Pal, S.K. Pal, Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: a review, *Journal of Materials Engineering and Performance* VOL. 20, No. 6, pp. 918-931 (2011).
4. V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G.M. Reddy, Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* VOL. 36, No. 3-4, pp. 254-262 (2008)
5. S.K. Rao, G.M. Reddy, M. Kamaraj, K.P. Rao, Grain refinement through arc manipulation techniques in Al–Cu alloy GTA welds, *Materials Science and Engineering:* A VOL.404, No. 1-2, pp. 227-234 (2005)
6. V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G.M. Reddy, Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behaviour of AA7075 aluminium alloy joints, I*nternational Journal of Fatigue* VOL.30, No. 3, pp.405-416 (2008)
7. G. Fu, F. Tian, H. Wang, Studies on softening of heat-affected zone of pulsed-current GMA welded Al–Zn–Mg alloy, *Journal of Materials Processing Technology* VOL.180, No. 1-3, pp. 216-220 (2006)
8. A. Kumar, S. Sundarrajan, Effect of welding parameters on mechanical properties and optimization of pulsed TIG welding of Al-Mg-Si alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* VOL. 42, No. 1-2, pp.118-125 (2009).
9. T.S. Kumar, V. Balasubramanian, S. Babu, M. Sanavullah, Effect of pulsed current GTA welding parameters on the fusion zone microstructure of AA 6061 aluminium alloy, *Metals and Materials International* VOL.13, No. 4, pp.345-351 (2007).
10. T.S. Kumar, V. Balasubramanian, M. Sanavullah, Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy, *Materials & design* VOL. 28, No. 7 pp.2080-2092 (2007).
11. S. Babu, T.S. Kumar, V. Balasubramanian, Optimizing pulsed current gas tungsten arc welding parameters of AA6061 aluminium alloy using Hooke and Jeeves algorithm, T*ransactions of Nonferrous Metals Society of China* VOL.18, No. 5, pp.1028-1036 (2008).
12. R. Manti, D. Dwivedi, Microstructure of Al–Mg–Si weld joints produced by pulse TIG welding, *Materials and Manufacturing Processes* VOL. 22, No. 1, pp. 57-61 (2007).
13. S. Kou, Y. Le, Nucleation mechanism and grain refining of weld metal, *Weld J*, VOL. 65, No. 4, pp.65-70 (1986).

14. T. Mohandas, G. Madhusudan Reddy, Effect of frequency of pulsing in gas tungsten arc welding on the microstructure and mechanical properties of titanium alloy welds: A technical note, *Journal of materials science letters* VOL. 15, No. 7, pp. 626-628 (1996).

15. D. Shelwatkar, G.M. Reddy, A. Gokhale, Gas tungsten arc welding studies on similar and dissimilar combinations of Al-Zn-Mg alloy RDE 40 and Al-Li alloy 1441, *Science and technology of welding and joining*, VOL. 7, No. 6, pp.352 (2002).

16. S. Kou, Y. Le, Grain structure and solidification cracking in oscillated arc welds of 5052 aluminum alloy, *Metallurgical Transactions A*, VOL. 16, No. 7, pp.1345-1352 (1985).

17. S.K. Rao, G.M. Reddy, M. Kamaraj, K.P. Rao, Grain refinement through arc manipulation techniques in Al–Cu alloy GTA welds, *Materials Science and Engineering: A*, VOL. 404, No. 1, pp. 227-234 (2005).

18. F. Rui-Dong, S. Zeng-Qiang, S. Rui-Cheng, L. Ying, L. Hui-jie, L. Lei, Improvement of weld temperature distribution and mechanical properties of 7050 aluminum alloy butt joints by submerged friction stir welding, *Materials & Design*, VOL. 32, No. 10, pp. 4825-4831 (2011).

19. C. Bloem, M. Salvador, M. Vergara, V. Amigó, Aluminium 7020 alloy and its welding fatigue behaviour, INTECH Open Access Publisher, (2011).

20. V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G.M. Reddy, Effect of pulsed current welding on fatigue behaviour of high strength aluminium alloy joints, *Materials & Design*, VOL. 29, No. 2, pp. 492-500 (2008).

21. G. Fu, F. Tian, H. Wang, Studies on softening of heat-affected zone of pulsed-current GMA welded Al–Zn–Mg alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, VOL. 180, No. 1, pp. 216-220 (2006).

22. M. Nicolas, A. Deschamps, Precipitate microstructures and resulting properties of Al-Zn-Mg metal inert gas-weld heat-affected zones, *Metallurgical and Materials Transactions A*, VOL. 35, No. 5, pp. 1437-1448 (2004).

23. A.C. Munoz, G. Rückert, B. Huneau, X. Sauvage, S. Marya, Comparison of TIG welded and friction stir welded Al–4.5 Mg–0.26 Sc alloy, *journal of materials processing technology*, VOL. 197, No. 1, (2008).